

# ANALYSE DES ENERGIEHAUSHALTS EINER ZUKUNFTSFÄHIGEN MONDINFRASTRUKTUR FÜR DEN BAU VON WELTRAUMGESTÜTZTEN SONNENSCHUTZSCHILDEN

D. Acker\*<sup>†</sup>, T. Maheswaran<sup>†</sup>

J. Palacios Calatayud\*, E. Gutiérrez Rojas\*, A. Pippert\*, P. Modi\*, C. Mortan<sup>‡</sup>, S. Fasoulas<sup>†</sup>

\* ASTRAEUS - Advanced Space Technology Research for Astronautical Exploration of Uncharted Space,  
Stuttgart, Deutschland

<sup>†</sup> Institut für Raumfahrtssysteme (IRS), Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 29, 70569 Stuttgart, Deutschland

<sup>‡</sup> Institut für Photovoltaik (*ipv*), Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart, Deutschland

## Zusammenfassung

Die drastischen klimatischen Entwicklungen verdeutlichen, dass die bisherigen Maßnahmen nicht ausreichen, um das Erreichen kritischer Klimakippunkte zu verhindern. Ergänzend zu den diversen terrestrischen Klimamaßnahmen werden derzeit die Potenziale eines weltraumgestützten Klimamanagementsystems - dem International Planetary Sunshade (IPSS) - zum kurzfristigen Aufbau eines zeitlichen Puffers untersucht. Das Konzept sieht vor, große, leichte Strukturen, vorzugsweise aus Weltraumressourcen, im Lagrange-Punkt L1 zwischen Sonne und Erde zu platzieren, um einen Bruchteil des Sonnenlichts davon abzuhalten, die Erde zu erreichen, indem es bereits im All reflektiert wird. Die Fertigung und Montage im Weltraum (ISMA) könnte eine nachhaltige Fertigung großer, lastoptimierter Strukturen in der Erdumlaufbahn unter Verwendung von Materialien und Ressourcen ermöglichen, die in der Weltraumumgebung zur Verfügung stehen, wie z. B. Mond- oder Asteroidenmaterial. Die Einbindung einer lunaren Infrastruktur erhöht die Komplexität des Gesamtsystems und erfordert eine umfassende Analyse der technologischen, logistischen als auch fertigungsspezifischen Herausforderungen. Die Analyse des Energiehaushaltes der relevanten Subsysteme auf dem Mond sowie im cislunaren Raum ist essentiell, um die zeitliche sowie technologische Machbarkeit abschätzen zu können. Das Design sowie die relevanten Teilsysteme für eine geeignete lunare Infrastruktur basieren auf dem modularen und skalierbaren Ansatz der DIANA-Mondinfrastruktur. Die DIANA-Infrastruktur umfasst essenzielle Einrichtungen und Dienste, die für die Forschung und das Leben auf der Mondoberfläche notwendig sind, wie z.B. Transport, Habitate, Energieinfrastruktur unter Einbindung von lokaler Ressourcennutzung. In diesem Beitrag werden die Schlüsselemente für eine selbsttragende Mondinfrastruktur unter dem Gesichtspunkt der Energieinfrastruktur beleuchtet. Der Energiebedarf für die lunare Infrastruktur wird durch eine Kombination aus erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Quellen gedeckt. Für den Aufbau und die Instandhaltung der lunaren Infrastruktur ist vor allem der Einsatz von Technologien zur solaren und nuklearen Energieerzeugung vorgesehen. Unter Verwendung vorhandener Daten und Modellierungstechniken wird der Energiebedarf für die Teilsysteme ermittelt und die Machbarkeit der Deckung dieses Bedarfs mit verschiedenen Energiequellen bewertet. Die detaillierte Beschreibung der Energiebudgetanalyse ist unterteilt in die Kategorien Transportsysteme, ISRU Technologien, die logistische Schnittstellen zwischen ISRU und ISMA-Einrichtung. Ziel dieser Arbeit ist es, die verschiedenen Infrastrukturtechnologien und den kontinuierlichen Energiebedarf zu untersuchen, die für die Errichtung und den Unterhalt einer nachhaltigen Mondbasis erforderlich sind, um die Realisierung der Sunshades im Rahmen der IPSS Zeitspanne ermöglichen zu können.

## Keywords

In-Situ Resource Utilization (ISRU); Lunare Energieinfrastruktur; Klimaschutz; Weltraumressourcen; Nachhaltigkeit; Solar Radiation Management (SRM); Model-Based System Engineering

## NOMENKLATUR

### Abkürzungen

ACH	Aluminium Chloride Hexahydrate
CDR	Carbon Dioxide Removal
DIANA	Dedicated Infrastructure and Architecture for Near-Earth Astronautics
FLOAT	Flexible Levitation on a Track
IPSS	International Planetary Sunshade
ISMA	In-Space Manufacturing and Assembly
ISRU	In-Situ Ressource Utilization
RASSOR	Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot
Reg-X	Regolith Excavation Rover
SRM	Solar Radiation Management

## 1. EINLEITUNG

### 1.1. Klimawandel und Solar Radiation Management

Der Klimawandel und seine Auswirkungen stehen aufgrund der akuten Entwicklungen im zentralen Fokus weltweiter Anstrengungen und wissenschaftlicher Forschung [1]. Das ambitionierte Ziel im Rahmen des Pariser Abkommen von 2015 sieht eine Begrenzung der globalen Erderwärmung auf 2 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau vor, um potenzielle katastrophale Klimakippunkte zu verhindern [2]. Jedoch haben jüngste Entwicklungen wie die COVID-19-Pandemie, das Auftreten extremer Dürren und anhaltende Konflikte die deutliche Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, insbesondere Öl und Erdgas, unterstrichen. Die Tatsache, dass die Europäische Union Gas als umweltfreundliche Technologie anerkannt hat [3], verstärkt die Sorge, dass die Ziele des Pariser Abkommens möglicherweise nicht erreicht werden können. [4] Jüngste Studien [5] warnen eindringlich davor, dass die Erde einer drastischen Erwärmung um mehr als 3 Kelvin entgegenblicken könnte, wenn keine verstärkten Maßnahmen im Bereich des Klimaschutzes und der Technologieentwicklung ergriffen werden [6]. Die wirtschaftlichen Kosten der mangelnden Handlungsbereitschaft werden auf bis zu 178 Billionen US-Dollar für die Weltwirtschaft bis zum Jahr 2070 geschätzt [7]. Angesichts dieser Herausforderungen ist es von entscheidender Bedeutung, die bisherigen Anstrengungen zum Übergang zu Netto-Null-Emissionen zu verstärken und den Klimawandel abzumildern. Dies erfordert nicht nur den Wandel zu erneuerbaren Energien, sondern auch aktive Maßnahmen

zur Reduzierung der Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre, um das vorindustrielle Klimaniveau wiederherzustellen. Eine wichtige Strategie zur Erreichung dieses Ziels besteht in der Kohlenstoffdioxidentfernung (Carbon Dioxide Removal, CDR), die verschiedene Ansätze wie Aufforstung, die Erzeugung von Biomasseenergie mit CO<sub>2</sub>-Speicherung, boden- und ozeanbasierte Verwitterung, Ozeandüngung und direkte Luftabscheidung umfasst [8]. Es ist jedoch zu beachten, dass diese CDR-Maßnahmen oft mit der bereits intensiven Landnutzung in Konflikt stehen [9]. Darüber hinaus wird die Steuerung der solaren Strahlung (Solar Radiation Management, SRM) als ergänzende Strategie untersucht [10]. Die SRM hat das Ziel, den Strahlungshaushalt der Erde zu beeinflussen, um die Oberflächentemperatur zu senken und somit Zeit für CDR-Maßnahmen und den Übergang zu erneuerbaren Energien zu gewinnen. Beispiele für SRM-Ansätze sind die Erhöhung des Oberflächenalbedos [11, 12], die Aufhellung mariner Wolken [13] und die Verteilung von Aerosolen in die Stratosphäre [13], wobei letztere die bekannteste Technik ist. Besonders vielversprechend ist die welt-raumbasierte SRM, da sie keine Veränderungen in der Erdatmosphäre oder auf der Erdoberfläche erfordert [14]. Ein planetarischer Sonnenschild zwischen Erde und Sonne, der die Sonnenstrahlung reflektiert, bietet eine effiziente Möglichkeit, den Strahlungshaushalt der Erde zu stabilisieren. Die optimale Position für einen solchen Sonnenschild befindet sich am Sonne-Erde-Lagrange-Punkt 1, der ein günstiges Verhältnis zwischen Systemmasse und benötigter Sonnenschildfläche bietet [15]. Diese Technologie ermöglicht eine präzise Modellierung und Kontrolle der klimatischen Auswirkungen [16], wobei initiale technologische sowie klimatische Aspekte in zahlreichen Studien thematisiert wurden [16–18]. Die aktuelle Forschung konzentriert sich darauf, eine umfassende Systemanalyse der Sonnenschild-Konstellation unter Verwendung von Weltraumressourcen für die Herstellung durchzuführen, um die Umweltauswirkungen von Raketenstarts zu minimieren [19, 20]. Das vorgeschlagene Konzept des International Planetary Sunshades (IPSS) könnte ein entscheidender Schritt in Richtung einer nachhaltigen und effektiven SRM-Strategie sein, die den Übergang zu erneuerbaren Energien unterstützen könnte.

### 1.2. Der Mond als Sprungbrett

Um ein nachhaltiges Konzept mit minimalem ökologischem Einfluss auf unseren Planeten zu realisieren, erweist sich die Integration von Weltraumressourcen als unerlässlich, insbesondere angesichts der erheblichen Massenforderungen von bis zu 500 Millionen Tonnen [19–21]. Der Mond stellt eine diverse Auswahl von essenziellen Materialien zur Verfügung, darunter Sauerstoff, Silizium, Aluminium, Eisen, Titan, Magnesium und Calcium [22], wobei potentielle erdnahe Asteroiden als Ergänzung Koh-

lenstoff bereitstellen können [23]. Durch die Nutzung lunarer Ressourcen und kohlenstoffbasierter Materialien kann ein Produktionssystem für Sonnenschilde entwickelt werden, wobei in späteren Phasen fortschrittliche Sonnenschilddesigns unter Einbeziehung von asteroidaler Ressourcen erörtert werden können. Derzeit arbeiten Raumfahrtagenturen sowie -industrie intensiv an zahlreichen Technologien zur Nutzung lunarer Ressourcen und zur Herstellung vor Ort wie beispielsweise lunare Solarzellen [24], wodurch die Möglichkeit gegeben ist, auf internationalen Entwicklungsinitiativen aufzubauen. Angesichts des kritischen Zeitrahmens erfordert die Nutzung lunarer Ressourcen eine evolutionäre Architektur des IPSS Systems. In diesem Kontext wurde ein vierphasiger Fahrplan entworfen, in dem der Mond als zentrales Testgelände für die Produktionstechnologien des IPSS Systems und als primäre Quelle für primäre Materialien der Sonnenschilde fungiert. Die erste Phase ist bereits im Gange und umfasst die Anpassung und Hochskalierung von bereits in Entwicklung befindlichen Technologien sowie die Initiierung neuer relevanter Technologien. Das Ziel der ersten Phase besteht darin, diese Technologien in ihrer jeweiligen Umgebung unabhängig voneinander zu validieren. Die zweite Phase beinhaltet die Integration erfolgreich validierter Technologien in ein kleinskaliges End-to-End-Produktionssystem für Sonnenschilde. Die dritte Phase sieht die hochskalierte Produktion von Sonnenschilden vor, während die Fertigung und Montage von Sonnenschildkomponenten zum Sonne-Erde-Lagrange-Punkt 1 verlagert werden. Die abschließende vierte Phase beinhaltet die Bereitstellung und den Betrieb von Sonnenschilden in ihren jeweiligen Betriebsorbits. Der Mond spielt eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung eines erdunabhängigen IPSS-Systems, wobei eine robuste lunare Energieinfrastruktur notwendig ist, um die Bereitstellung des hohen Materialbedarfs sowie den initialen Transport der aufbereiteten Materialien sowie Halbzeuge in den cislunaren Raum gewährleisten zu können.

### 1.3. Motivation

Basierend auf der in [20] entwickelten Roadmap ist das übergeordnete Ziel, eine modulare kollaborative Modellierungsplattform für ein digitales IPSS-Modell aufzubauen, um in internationaler Zusammenarbeit die technologischen, logistischen und klimatischen Rahmenbedingungen zu bewerten und potenzielle Sonnenschutzkonzepte ableiten zu können (Kapitel 2). Im Rahmen dieser Arbeit werden erste Abschätzungen für eine modulare lunare Energieinfrastruktur erörtert, um ein evolutionäres IPSS-System [19, 21] ermöglichen zu können. Zunächst werden auf Basis des DIANA Konzeptes (Kapitel 3) die IPSS-relevanten ISRU-Technologien in Hinblick auf die Energieanforderungen beschrieben (Kapitel 4). Anschließend werden die relevanten Energiesysteme verglichen,

um ein modulares Konzept für die lunare Energieinfrastruktur anhand initialer Abschätzungen aufzuzeigen.

## 2. DIGITALES MODELL DES IPSS SYSTEMS

Die aktuelle Forschung konzentriert sich auf die Analyse der Möglichkeiten zur Umsetzung logistisch und technologisch modellierter Sonnenschildkonstellationen, um deren Auswirkungen auf das lokale und globale Erdklima zu bewerten. Dazu wird ein digitales Modell der Sonnenschildkonstellation in einem modellbasierten Systems Engineering - Ansatz entwickelt, das mit Klimavorhersagemodellen verknüpft werden soll. Hierbei ist es essenziell, die technologischen sowie energetischen Anforderungen für die Herstellung der Sonnenschilde, die Ressourcengewinnung und die Materiallogistik unter Einbeziehung nachhaltiger Antriebssysteme zu berücksichtigen. Darüber hinaus konzentriert sich die Systemanalyse auf parameterbasierte Modellierung verschiedener Sonnenschilddesigns, um fortschrittlichere Sonnenschilddesigns berücksichtigen zu können, wie beispielsweise einen photovoltaischen Sonnenschild zur Nutzung als weltraumgestützte Energieinfrastruktur für terrestrische und lunare Anwendungen. Potenzielle Synergien mit der Entwicklung von Solar Power Satellites für terrestrische Anwendungen sowie die Prüfung kritischer Technologien werden berücksichtigt. Dieser Ansatz ermöglicht einerseits die Untersuchung der Merkmale der robotergestützten Herstellung großer Strukturen unter Verwendung von Mondreferenzmaterial, um nachhaltige Ideen für Solar Power Satellites unter Verwendung von Weltraumressourcen zu entwickeln, und andererseits die Erforschung kritischer Faktoren für die Herstellung im Weltraum sowie des Materialbedarfs in initialen Testumgebungen in der Erdumlaufbahn, um die notwendigen Kapazitäten zur Herstellung der Sonnenschildkonstellation abzuleiten. Das gesamte Modell sollte modular und erweiterbar sein, um die effiziente Integration zukünftiger Forschung und technologischer Meilensteine im Optimierungsprozess zu ermöglichen. Das Hauptziel der Gesamtsystemanalyse besteht darin, ein flexibles digitales Modell zu etablieren, das den Rahmen für umfangreiche Parameterstudien bietet und als zentrale Wissensplattform dient, um aktuelle Daten aus technologischen Fortschritten und detaillierten Teilsystemanalysen zu integrieren. Eine erfolgreiche Umsetzung als Open-Source-Entwicklungsplattform ermöglicht die Integration in zukünftige Projekte wie Digital Twin Earth [25], um die Gesamtauswirkung auf die Erde umfassend bewerten zu können. Darüber hinaus sollte das Design der Modellierungsplattform den europäischen Plattformstandards entsprechen, um kontinuierliche Fortschritte durch die Zusammenarbeit mit größeren Projekt [26] zu ermöglichen. Außerdem soll die Plattform detaillierte Studien in Zusammenarbeit mit Klimaforschern ermöglichen, um zuverlässige Untersuchungsergebnisse für be-

vorstehende Berichte des Intergovernmental Panel on Climate Change zu liefern, sodass die Grundlage für das Verständnis von weltraumgestützten Sonnenschirmen als unterstützende Maßnahme zu terrestrischen SRM-Methoden auf wissenschaftlicher und politischer Ebene geschaffen werden kann.

### 3. DAS DIANA KONZEPT

Das Ziel von DIANA besteht darin, eine modulare Architektur für die menschliche Besiedlung der Mondoberfläche zu schaffen und eine Infrastruktur zu etablieren, die sich auf die effiziente Gewinnung lunarer Ressourcen und die In-situ-Nachhaltigkeit spezialisiert. Zu diesem Zweck wurde der De-Gerlache-Krater am Südpol des Mondes (88,71°S, 68,7°W) [27, 28] ausgewählt. Dieser Standort ermöglicht die Gewinnung von Wassereis in den dauerhaft im Schatten liegenden Regionen [27, 28], welche für lebenserhaltende Maßnahmen von Bedeutung ist, und weist zudem ein relativ ebenes Terrain auf [27, 28], welches den Einsatz von Robotersystemen für den Abbau als auch den Transport von Rohstoffen erleichtert. In Bezug auf die Energieversorgung bietet der Standort den Vorteil, dass er lokal etwa 86 % des Jahres über Sonnenlicht [27, 28] verfügt. An den Krater rändern entspricht die Sonnenverfügbarkeit ca. 30 % bis 65 % [27].

Der Basisaufbau des DIANA Konzeptes besteht aus drei Modulen (Wohnbereich, Gewächshaus und Multifunktionslabor) [28]. Dieser soll es ermöglichen 4 Astronauten zu beherbergen, welche sich um den operationellen Betrieb der lunaren Infrastruktur kümmern [28]. Zum Schutz vor Strahlungseinflüssen, den Temperaturgradienten von 170 K [27] und vor Mikrometeoriteneinschlägen wird die Basis mit einer 1,6 m dicken Schicht aus Regolith bedeckt [28, 29].

### 4. IN-SITU RESSOURCE UTILIZATION

Um die ordnungsgemäße Entwicklung einer Mondbasis zu gewährleisten, muss eine starke ISRU-Struktur geschaffen werden, um die Abhängigkeit von der Erde zu vermindern. In diesem Abschnitt wird sich der ISRU-Vorschlag auf die Produktion von Aluminium und Glas konzentrieren, um die in diesem Paper vorgeschlagenen Aktivitäten und Anforderungen zu unterstützen. Das Mondregolith enthält wichtige Bestandteile, die für die Erschließung von Ressourcen auf der Mondoberfläche sehr wichtig sind. In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Gewinnung von Glas, Aluminium als auch Basalt-Fasern gesetzt, da diese wichtige Bestandteile der IPSS- als auch Solarzellenproduktion sind [21, 30]. Unter den Regolithen des Mondes ist Anorthit ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) eine der interessantesten Arten, da es Aluminium und Siliziumdioxid in seiner Zusammensetzung enthält und auf der Mondoberfläche relativ häufig vorkommt [31].

#### 4.1. Regolithverarbeitung - Anforderungen an die Ausgrabung

Um die Produktion der benötigten Ressourcen aufrechtzuerhalten, wird der Abbau von Regolith erforderlich sein. Zu diesem Zweck wird die Nutzung der Ressourcen und der Abbaustätten, die in dem Paper [32] vorgeschlagen wurden, als Grundlage verwendet.

Die Gesamtmengen an Regolith, die für die Fertigstellung beider Systeme, die kompletten Solarzellen für die Energieversorgung und die Sonnenschirme für das IPSS-Projekt abgebaut werden müssen, sind in Tabelle 1 aufgeführt, ebenso wie die daraus gewonnenen Mengen an Glas, Aluminium und Basalt-Fasern.

#### 4.2. Regolithverarbeitung - Prozesse und Energiebedarf

Die ISRU-Aktivitäten zur Verarbeitung all dieser Materialien sind mit einem Energieverbrauch verbunden, der in Tabelle 1 ebenfalls in absoluten und jährlichen Werten in Bezug auf die geplanten Zeiträume angegeben ist. Die Nutzer dieser Energie sind die Produktionsprozesse für die Herstellung der verarbeiteten Materialien für die IPSS und die Solarzellenproduktion.

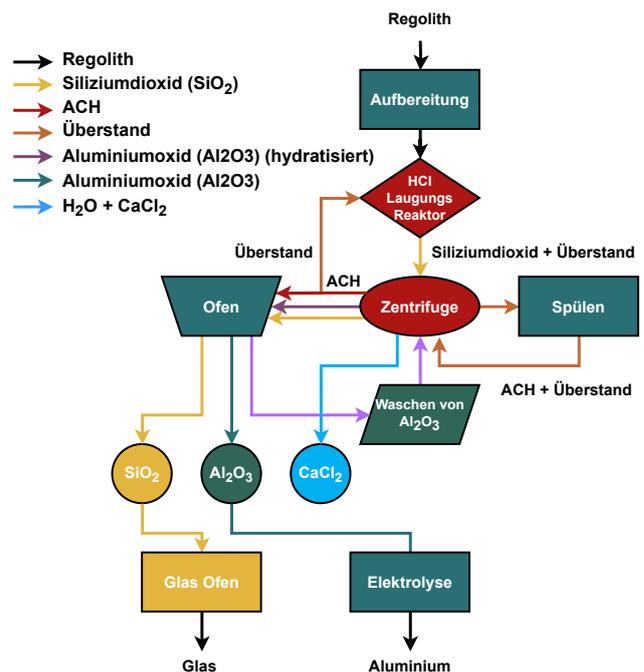


BILD 1. Prozessentwurf für die Gewinnung von Siliziumdioxid und Aluminium (Adaption von [33]).

In Abbildung 1 ist eine modifizierte Version eines Verfahrens dargestellt, das zur Umwandlung von Mondregolith in die verarbeiteten Materialien Aluminium und Glas angewendet wird. Dieser Prozess beinhaltet eine chemische und physikalische Trennung der Regolithverbindungen, wodurch Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) gewonnen werden. Mithilfe von speziell an die Bedingungen auf dem Mond angepassten Öfen werden Aluminium und Glas produziert, die

für die Herstellung von Solarzellen und IPSS verwendet werden.

Für die Herstellung von Basalt-Fasern wird ein System eingesetzt, dessen Funktionsfähigkeit unter Mikrogravitationsbedingungen auf einer Höhenforschungsrakete nachgewiesen wurde [34]. Dieses Verfahren ermöglicht eine Produktion von 50 kg Basalt-Fasern pro Stunde, bei einem vergleichsweise geringen Energiebedarf von lediglich 2 kW [34].

Es sei darauf hingewiesen, dass diese Prozesse noch nicht unter Mondbedingungen getestet wurden, sondern als geeignete Basistechnologien für die Entwicklung von Produktionsanlagen auf der Mondoberfläche ausgewählt wurden.

**TAB 1. Energie- und Ressourcen-Kennzahlen für ISRU.**

	Sunshade	Solar Park
Gesamte Regolithmasse [t]	$6723,05 \times 10^5$	$150,12 \times 10^3$
Gesamte Glasmasse [t]	$1000,00 \times 10^5$	$44,38 \times 10^3$
Gesamt-Aluminiummasse [t]	$262,14 \times 10^5$	110,96
Gesamtmasse der Basaltfasern [t]	$1485,14 \times 10^5$	-
Leistungsbedarf pro Jahr [kW/Jahr]	$292,22 \times 10^3$	480,32
Verarbeitungszeitrahmen [Jahre]	20	8
Gesamt-Leistungsbedarf [kW]	$58,44 \times 10^5$	$3,84 \times 10^3$

#### 4.3. Regolith Abbau

Für die Gewinnung von Mondgestein (1 cm) und Mondstaub ( $\mu\text{m}$ ) kommen unterschiedliche Abbautechniken zum Einsatz. Der Feinstaub auf der Oberfläche wird zunächst mithilfe einer pneumatischen Abbautechnik entfernt. Hierbei kommt der Regolith Excavation Rover (REG-X) zum Einsatz, ein fortschrittlicher pneumatischer Grabungsrover, der mit einem thermoelektrischen Radioisotopengenerator und Sekundärbatterien für einen langfristigen unabhängigen Betrieb ausgestattet ist und vom DIANA Robotik Team basierend auf [35] ausgelegt wurde. Das System arbeitet in einem isolierten Raum und nutzt den Venturi-Effekt, um den feinen Regolithstaub von der Mondoberfläche zu lösen [32].

Um das hochdichte Mondgestein abzubauen, soll der NASA-Roboter RASSOR (Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot, verwendet werden [36]. Dieser Roboter ist speziell für den effizienten Oberflächenabbau in der geringen Schwerkraft des Mondes ausgelegt und verwendet gegenläufige Trommeln an Vorder- und Rückseite. Die integrierten Schaufeln in den Trommeln graben sich in den Boden und füllen sich durch ihren Rotationsmechanismus (20 U/min) mit ausreichend Mondgestein, das dann von RASSOR für den Transport in den Transportbehälter abgelegt wird [32, 36, 37].

#### 4.4. Material Transport

Für den Transport der Rohstoffe ist zwischen zwei Fällen zu unterscheiden.

- 1) Transport des abgebauten Regoliths
- 2) Transport der verarbeiteten Rohstoffe

Im Hinblick auf den Transport des Mondregoliths selbst wird in Betracht gezogen, das Konzept des Flexible Levitation on a Track (FLOAT) der NASA zu nutzen [37]. Dieses Konzept bietet im Vergleich zu robotischen Transportsystemen eine höhere Transportkapazität [37]. Ein wesentlicher Vorteil des FLOAT-Konzepts liegt in seiner Anwendung von Magnetschwebetechnologie, was einen reibungslosen Transport ermöglicht [37]. Die Beförderung der verarbeiteten Rohstoffe, darunter Glas, Aluminium und Basaltfasern, soll ebenfalls durch ein auf Magnetschwebetechnologie basierendes Konzept realisiert werden. Zu diesem Zweck wurde das FLOAT-System [37] entsprechend modifiziert, um den Transport bereits verarbeiteter Rohstoffe zu ermöglichen. Dieses modifizierte System (Lunar-MagWay) ist in der Lage, Nutzlasten von bis zu 125 kg zu befördern [38].

### 5. ENERGIESYSTEM

#### 5.1. Solarenergie Infrastruktur

Unter Berücksichtigung aller notwendigen Module für den Abbau, die Verarbeitung und den Transport der Materialien, die sowohl für den Sunshade (IPSS) als auch für die DIANA-Basis auf dem Mond erforderlich sind, wurde ein Gesamtenergiebedarf von 17,5 GW ermittelt. Dieser Energiebedarf umfasst die notwendige Leistung für den Betrieb einer Coilgun, die die verarbeiteten Ressourcen von der Mondoberfläche zur ISMA-Station im Orbit befördern soll, wobei kontinuierlich 10 GW allein für diese Aufgabe benötigt werden [39]. Für die Bereitstellung der benötigten Energie wurde zunächst in Betracht gezogen, die erforderlichen Energiesysteme von der Erde aus zur Basis zu transportieren. Diese Option wurde jedoch verworfen, da die Anzahl der benötigten Raketenstarts sich im hohen vierstelligen Bereich befunden hätte. Für diese Untersuchung wurden zwei Energiequellen in Erwägung gezogen: Solarmodule mit einer potenziellen Energieerzeugung von 10 kW pro Modul und Fissionsreaktoren mit Energieerzeugungsraten von bis zu 40 kW pro Reaktor [40–42]. Eine alternative Herangehensweise zur Reduzierung der Anzahl der erforderlichen Raketenstarts wäre die Herstellung von Silizium Solarzellen auf dem Mond in Kombination mit Fissionsreaktoren von der Erde, die während der Nachtphasen eingesetzt werden könnten. Studien haben jedoch gezeigt, dass lunare Solarzellen Effizienzen von lediglich 10 % erreichen könnten und Siliziumschichten mit einem Reinheitsgrad von 99,99 %

**TAB 2. Eckdaten der Schichtstruktur, einschließlich der erforderlichen Fertigungsverfahren.**

Material	Fertigungsmethode	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Schichtdicke [m]	Spezifische Masse [kg/m <sup>2</sup> ]
Glas [44]	Schmelzen, Rolle-zu-Rolle-Verfahren (R2R)	2200	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-1}$
Kleber [45]	Kantenversiegelung, Extrusion	1200	$1 \times 10^{-5}$	-
Al [46]	Vakuum, thermische Verdampfung	2700	$2 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-4}$
NiO <sub>x</sub> [47]	E-Strahl-Verdampfung	6700	$5 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-4}$
Perowskit [48]	Vakuum, PVD / CVD	4000	$5 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-3}$
SnO <sub>2</sub> [49]	Vakuum, thermisches Aufdampfen, E-Strahl-Verdampfung	7000	$5 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-4}$
FTO [49]	Zerstäubung	7000	$1 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-3}$
Glas [44]	Schmelzen, Rolle-zu-Rolle-Verfahren (R2R)	2200	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-1}$

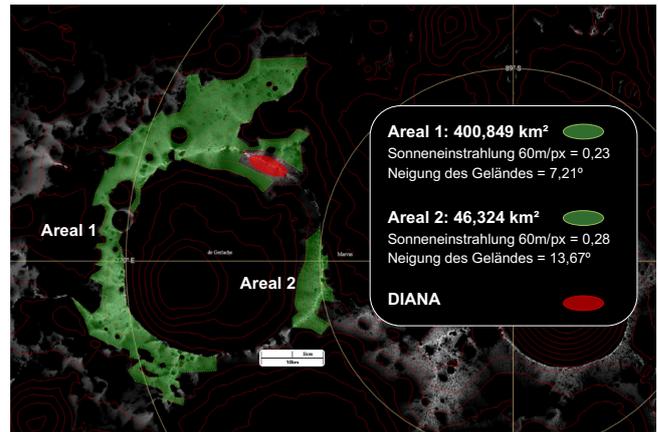
erfordern würden, um diese Effizienz tatsächlich zu gewährleisten. Eine Technologie, die weitgehend mit lunar gewonnenen Ressourcen hergestellt werden kann und vergleichsweise geringe Mengen an Rohstoffen von der Erde benötigt, ist Perowskit. Auf der Erde können Perowskit-Solarzellen Effizienzen von bis zu 27% erreichen [43]. Abbildung 2 zeigt einen potenziellen Aufbau von Perowskit-Solarzellen für den Einsatz im lunaren Umfeld. Mit dieser Schichtung können durchschnittliche Effizienzen von bis zu 20% erwartet werden.



**BILD 2. Aufbau von Perowskit-Solarzellen für den Einsatz in der lunaren Umgebung.**

Für die Herstellung dieser Solarzellen wäre lediglich die Produktion von Glas für die Grund- und Deckplatte sowie Aluminium, das mittels thermaler Verdampfung auf das Glas aufgebracht werden müsste, erforderlich. Tabelle 2 zeigt die benötigten Fabrikationsmethoden für die jeweiligen Schichten als auch deren Dicken und spezifischen Massen. Die geschätzte benötigte Masse für den Aufbau einer Fabrik zur Herstellung von Perowskit-Solarzellen beträgt 600 Tonnen.

Unter Berücksichtigung der solaren Sichtbarkeit am de Gerlache Crater [27], des Einstrahlwinkels der Sonne [50] und eines Sicherheitsmargins zur Berücksichtigung von gegenseitiger Abschattung der Paneele wurde eine Gesamtfläche von 408 km<sup>2</sup> an Solarpaneelen ermittelt, um die erforderlichen 17,5 GW Energie für das IPSS-System und DIANA bereitzustellen [27]. Abbildung 3 zeigt die notwendige Flächenverteilung um den de Gerlache Crater, einschließlich eines Sicherheitsmargins von 10%.



**BILD 3. Darstellung der benötigten Fläche für die Errichtung des Perowskit Solar Parks für Konzept 1 [27].**

Um den zeitlichen Restriktionen des IPSS-Systems gerecht zu werden, wurde eine Produktionsrate von 30 cm/s und eine Paneelgröße von 12,5 m<sup>2</sup> angenommen. Zur Bestimmung des erforderlichen Energiebedarfs für die Herstellung der Paneele wurde der Ansatz der Energie-Rücklaufzeit (EPBT) verwendet, der für Perowskit-Solarzellen derzeit bei 0,2 Jahren liegt [51]. Damit wurde ein Energiebedarf von 1,3 GW für die Herstellung der Paneele ermittelt. Dies führt letztendlich zu einem Gesamtenergiebedarf von 19 GW für die lunare Infrastruktur.

Um die benötigten 1,3 GW Energie bereitzustellen, sollen die bereits zuvor erwähnten Technologien (terrestrische Solarpaneel und Fissionsreaktoren) [40–42] verwendet werden.

Die Stützstrukturen, die erforderlich sind, um sicherzustellen, dass der Winkel zur Sonne 70° beträgt, sollen von denselben 3D-Druckrobotern hergestellt werden, die auch für den Druck der Habitat-Schutzschicht eingesetzt werden sollen [29]. Diese Roboter verfügen über ein eigenständiges, unabhängiges Energiesystem. Die benötigte Masse für die Stützstrukturen und die daraus resultierende Menge an benötigtem Regolith zur Herstellung wurden aufgrund einer Schätzung von 40% der Masse eines Paneels getroffen [17] (siehe Tabelle 3). Um die erforderliche Gesamtfläche des Energiesystems zu minimieren, wurden alternative Ansätze untersucht. Einer dieser Ansätze setzt auf zusätzliche Spiegel

zur Steigerung der Energieerzeugung, während der andere auf Strukturen von der Erde setzt, die es ermöglichen, die Perowskite-Paneele kontinuierlich zur Sonne auszurichten, um die Energiegewinnung zu maximieren. Für die erste Anpassung des Konzepts werden Spiegel auf der Rückseite der Aufständigung der Solarpaneele angebracht. Diese Spiegel können aus auf dem Mond verfügbaren Rohstoffen hergestellt werden [32]. Die Spiegel leiten Sonnenlicht, das auf die Rückseite der Paneele trifft, zu den dahinter liegenden Solarpaneelreihen um, wodurch die Gesamtausbeute der Solarpaneele erhöht wird. Dieser Zugewinn an Energie setzt insbesondere an den Paneelen ein, die bereits in flachem Winkel zur Sonne stehen. Durch die zusätzliche Nutzung des Sonnenlichts und der Solarpaneele lässt sich die benötigte Gesamtfläche auf 388,36 km<sup>2</sup> reduzieren [52, 53]. Der alternative Ansatz, der die Nutzung von Strukturen und Mechanismen von der Erde vorsieht, geht davon aus, dass die Paneele kontinuierlich in Richtung Sonne ausgerichtet werden können. Insbesondere in Bereichen des Kraters, in denen die höchste solare Sichtbarkeit zu erwarten ist, ist mit einem signifikanten Zugewinn zu rechnen [27]. Die Sicherheitsmargin der potenziell auftretenden Abschattung zwischen den Paneelen ist hierbei um 50 % größer gewählt worden als bei Konzept 1 und 2, da es sich um senkrecht stehende und rotierende Strukturen handelt. Unter diesen Annahmen könnte die Gesamtfläche des Konzepts auf 295,4 km<sup>2</sup> reduziert werden. Basierend auf dieser benötigten Gesamtfläche lässt sich die Gesamtmasse der von der Erde zu transportierenden Struktur auf in etwa 12.408 t gemäß [17] berechnen (siehe Tabelle 3). Dies führt dazu, dass dieses Konzept zwar die geringste Fläche benötigt, jedoch die Anzahl der benötigten Raketenstarts erhöht, was die Gesamtnachhaltigkeit des Systems negativ beeinträchtigen würde.

**TAB 3. Vergleich der Perowskit Solar Park Konzepte. Konzept 1: Perowskit Paneele ohne Spiegel, Konzept 2: Perowskit Paneele mit Spiegeln, Konzept 3: Perowskit Paneele auf Mechanischen Stützstrukturen von der Erde.**

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Energieproduktion [GW]	17,50	17,50	17,50
Solar Paneel Fläche [m <sup>2</sup> ]	12,50	12,50	12,50
Benötigte Mondoberfläche [km <sup>2</sup> ]	408,80	388,36	295,40
Benötigte Solar Paneel Fläche [km <sup>2</sup> ]	204,40	183,96	98,47
Anstellwinkel zur Sonne [Grad]	70,00	70,00	90,00
Gesamt Solar Paneel Masse [t]	42.964,10	38.667,69	20.679,76
Gesamt Spiegel Masse [t]	-	4.000,00	-
Gesamt Stützstrukturmasse [t]	17.185,60	23.200,61	12.407,86
Benötigte Raketenstarts	37,00*	43,00*	83,00**

\* Bindemittel für 3D Druck, Perowskit, NiOx, SnO<sub>2</sub> und FTO

\*\* Fertige Module zur Nachführung der Paneele

## 5.2. Solar Paneel Wartung

Der Roboterarm stellt den neuesten Stand der Mondtechnologie dar und wurde speziell für die strengen

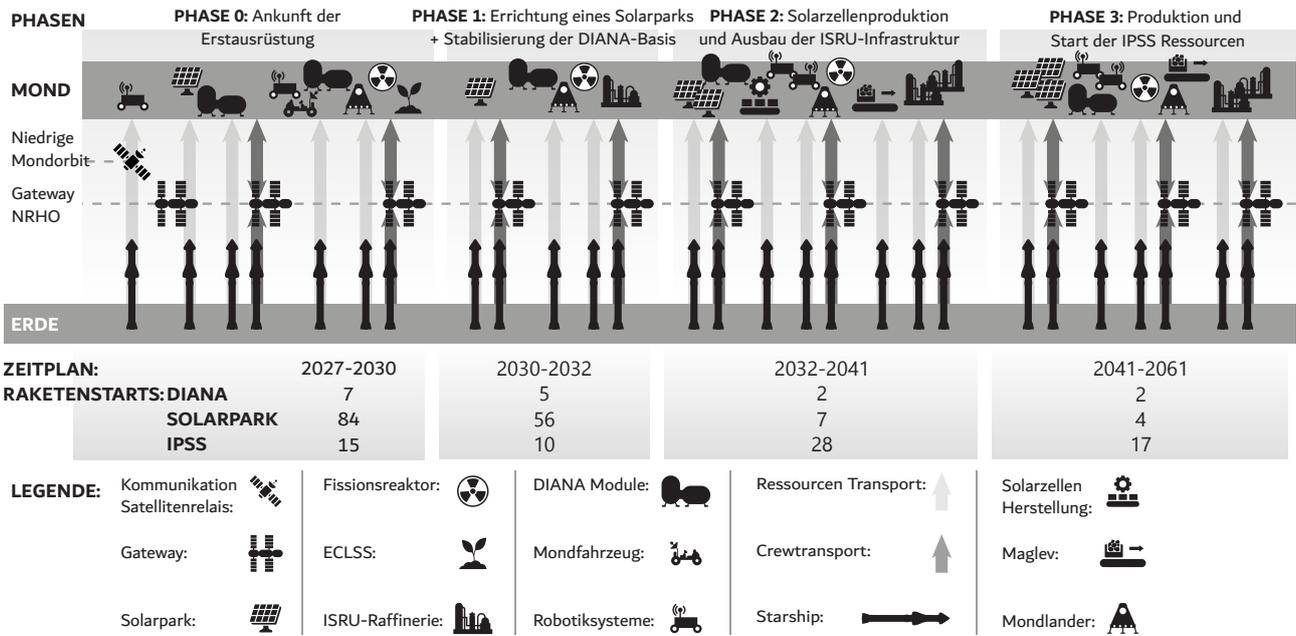
Anforderungen der Wartung und Instandhaltung der lunaren Solarfarm entwickelt. Der Roboterarm ist auf einem präzisionsgeführten Schienensystem montiert, um den Zugang zu den Solaranlagen innerhalb der kreisförmigen Farm bieten zu können. Zu den wichtigsten Merkmalen der Roboterarmtechnologie gehören die vollständige bis teilautonome Funktionalität, die vielseitige Manipulation, das geführte Schienensystem, die Möglichkeit der Fernsteuerung und die Sicherheit.

Der Roboterarm verfügt über fortschrittliche KI-Fähigkeiten, die es ihm ermöglichen, routinemäßige Wartungsaufgaben selbstständig durchzuführen. Ausgestattet mit einer Reihe von Sensoren und Kameras kann er Probleme wie Staubansammlungen, kleinere Schäden oder Fehlansichtungen in den Solarpaneelen erkennen [54]. Der Roboterarm soll mit einem multifunktionalen Satz von Werkzeugen ausgestattet sein, mit denen er eine Vielzahl von Aufgaben erledigen kann, von der Reinigung und Entstaubung der Solarpaneele bis hin zur Durchführung kleinerer Reparaturen. Seine Geschicklichkeit würde Präzision bei jeder Bewegung gewährleisten [55]. Der halbautonome Betrieb des Roboters ermöglicht es, dass er von qualifizierten Technikern aus einem Kontrollzentrum auf dem Mond ferngesteuert werden kann, um bei komplexeren Aufgaben die menschlichen Fähigkeiten zu unterstützen [56].

Um sich auf der Mondoberfläche fortzubewegen, ist der Roboterarm auf einem speziell entwickelten Schienensystem montiert, das die Solarfarm überspannt und einen einfachen Zugang zu jedem Paneel ermöglicht. Dank dieses geführten Schienensystems kann der Roboterarm auf dem Mondgelände präzise navigieren, was effiziente Wartungsarbeiten gewährleistet. In Bezug auf die Sicherheit sorgen die eingebauten Sicherheitsprotokolle dafür, dass der Arm Kollisionen mit anderen Geräten des Solarparks und mit Hindernissen auf dem Schienensystem vermeidet, wodurch sowohl seine eigene Sicherheit als auch die Integrität des Solarparks gewährleistet wird. In einer so anspruchsvollen und unnachgiebigen Umgebung wie der Mondoberfläche könnte der Arm ein praktikables Werkzeug für die erfolgreiche Wartung und den Betrieb von Solarfarmen auf dem Mond werden [55]. Durch die Integration in die Energieinfrastruktur kann ein kontinuierlicher Betrieb gewährleistet werden und zudem sichergestellt werden, dass der Energiebedarf der DIANA-Infrastruktur mit maximaler Effizienz gedeckt wird.

## 6. TIMELINE

Abbildung 4 präsentiert die zeitliche Abfolge der erforderlichen Raketenstarts für den Aufbau der lunaren Infrastruktur im Zeitraum von 2027 bis 2060. Hierfür wurde vorausgesetzt, dass der Transport aller benötigten Ressourcen von der Rakete Starship, der Firma SpaceX durchgeführt wird [57]. Während der Phase 0



**BILD 4. Übersicht der benötigten Raketenstarts zum Aufbau der Lunaren Infrastruktur.**

und Phase 1 sind die primären Nutzlasten die Solarmodule und Fissionsreaktoren, um die erforderliche Energie für die Produktion der Perowskit-Paneele auf die Mondoberfläche bereitzustellen. Gleichzeitig werden robotische Systeme für den Abbau, den Transport und die Verarbeitung von Regolith in dieser Phase bereitgestellt. Diese dienen dazu, die Basis mit allen notwendigen Ressourcen zu versorgen und den Aufbau der Solarpark-Fabrik zu gewährleisten. In Phase 2 liegt der Schwerpunkt auf dem Ausbau der ISRU Infrastruktur und dem Beginn der Produktion der Solarpaneele. Dieser Schritt zielt darauf ab, bis zum Beginn von Phase 3 die erforderliche Produktionskapazität sowie die Energiekapazität für das IPSS System bereitzustellen.

## 7. FAZIT UND AUSBLICK

Die energetischen Anforderungen für die modulare Mondinfrastruktur zur Bereitstellung lunarer Ressourcen erfordern eine Kombination der in Kapitel 5 vorgestellten Konzepte, um den zeitlichen Rahmen für den Aufbau des IPSS-Systems bei minimalem Einfluss auf die Erde und begrenzter Raketenstarts einzuhalten. Die technologischen und logistischen Herausforderungen eines IPSS-Systems erfordern eine frühzeitige Initiierung und internationale Zusammenarbeit. Die Entwicklung eines digitalen IPSS-Modells ermöglicht die Erörterung verschiedener Szenarien zur Identifizierung von Technologiebedarf und die zeitliche Integration eines evolutionären Sonnenschild-Designs in Verbindung mit terrestrischen Maßnahmen durch intensive internationale Zusammenarbeit. Spin-Ins sind ein Haupttreiber für die IPSS-Entwicklung, und das digitale Modell hilft, technisch-wirtschaftliche Hürden zu identifizieren

und zu überwinden. Zukünftige Forschung wird die Integration der Sonnenschilder als potenzielle Energiequelle für die lunare Infrastruktur sowie die Simulation zeitvariabler energetischer Szenarien untersuchen. Darüber hinaus werden die verbleibenden Subsysteme des digitalen Modells charakterisiert, um eine Wissensgrundlage für die Gestaltung eines globalen Entwicklungsplans für das IPSS-System zu schaffen. Kosten- und Risikoanalysen werden durchgeführt, um eine umfassende Bewertung der Auswirkungen des IPSS-Systems zu ermöglichen und einen geeigneten rechtlichen Rahmen auf der Grundlage des Potenzials zu entwerfen. Das Hauptziel ist die detaillierte Charakterisierung des IPSS-Systems, um ein internationales Verständnis für seine Integration in Klimaschutz-Roadmaps zu schaffen, was eine bedeutende Herausforderung und Gelegenheit für die wissenschaftliche Gemeinschaft darstellt.

### Kontaktadresse:

[denis.acker@astraeus-space.de](mailto:denis.acker@astraeus-space.de)

### Literatur

- [1] Copernicus Climate Change Service. July 2023 sees multiple global temperature records broken, 2023. <https://climate.copernicus.eu/july-2023-sees-multiple-global-temperature-records-broken>.
- [2] CA. Horowitz. Paris agreement. *International Legal Materials*, 55(4):740–755, 2016.
- [3] J. Ainger. Eu lawmakers remove last hurdle to label gas, nuclear as green, 2022. <https://www.>

- [bloomberg.com/news/articles/2022-07-06/eu-lawmakers-remove-last-hurdle-for-gas-nuclear-as-green](https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-07-06/eu-lawmakers-remove-last-hurdle-for-gas-nuclear-as-green).
- [4] National Oceanic and Atmospheric Administration. Climate change: Global temperature, 2023. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>.
- [5] The Intergovernmental Panel on Climate Change. Ar6 synthesis report: Climate change 2023, 2023.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022: Mitigation of climate change: Summary for policy makers, 2022.
- [7] P. Philip, C. Ibrahim, C. Hodges. The turning point: A global summary, 2022. <https://www.deloitte.com/global/en/issues/climate/global-turning-point.html>.
- [8] K. Caldeira, B. Govindasamy, L. Cao. The science of geoengineering. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41(1):231–256, 2013.
- [9] I. Dicaire. Climate engineering: Which role for space? *Proceedings of the 64th International Astronautical Congress 2013*, pages 9233–9241, IAC-13,D4,4,5,x20121, 2013.
- [10] L. Burns, D. Keith, P. Irvine, et al. Technology factsheet series: Solar geoengineering, paper. *Belfer Center for Science and International Affairs*, Harvard Kennedy School, June 2019.
- [11] R. Seitz. Bright water: Hydrosols, water conservation and climate change. *Climatic Change*, 105(3-4):365–381, 2011.
- [12] S. Menon, H. Akbari, S. Mahanama, et al. Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated co<sub>2</sub> offsets. *Environmental Research Letters*, 5(1):014005, 2010.
- [13] P.J. Rasch, J. Latham, C. Chen. Geoengineering by cloud seeding: Influence on sea ice and climate system. *Environmental Research Letters*, 4(4):045112, 2009.
- [14] J. Shepherd. *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*, volume 10, 2009 of *Excellence in science*. The Royal Society, London, 2009.
- [15] D. Keith, O. Morton, Y. Shyur, et al. Reflections on a meeting about space-based solar geoengineering. <https://geoengineering.environment.harvard.edu/blog/reflections-meeting-about-space-based-solar-geoengineering>.
- [16] J.P. Sánchez, C.R. McInnes. Optimal sunshade configurations for space-based geoengineering near the sun-earth L1 point. *PLoS one*, 10(8):e0136648, 2015.
- [17] R.G. Kennedy, K.I. Roy, D.E. Fields. Dyson Dots: Changing the solar constant to a variable with photovoltaic lightsails. *Acta Astronautica*, 82(2):225–237, 2013.
- [18] R. Angel. Feasibility of cooling the earth with a cloud of small spacecraft near the inner lagrange point (L1). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(46):17184–17189, 2006.
- [19] T. Maheswaran, D. Acker, S. Fasoulas, et al. The international planetary sunshade - an umbrella project to foster international collaboration to mitigate global warming. *Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress 2022*, 2022.
- [20] T. Maheswaran, S. Fix. Roadmap for an international planetary sunshade (ipss). *Proceedings of the 72nd International Astronautical Congress 2021*, 2021.
- [21] D. Acker. *Parametrized Sunshade Design Study for an Evolutionary Sunshade Concept*. Master thesis, University of Stuttgart, 2023.
- [22] I. Crawford. Lunar resources. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 39(2):137–167, 2015.
- [23] R. Bewick, J.P. Sánchez, C.R. McInnes. Usage of asteroid resources for space-based geoengineering. In V. Badescu, editor, *Asteroids*, pages 581–603. Springer, Heidelberg and New York, 2013.
- [24] Blue Origin. Blue alchemist technology powers our lunar future, 2023. <https://www.blueorigin.com/news/blue-alchemist-powers-our-lunar-future/>.
- [25] European Space Agency. Working towards a digital twin of earth. [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Working\\_towards\\_a\\_Digital\\_Twin\\_of\\_Earth](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Working_towards_a_Digital_Twin_of_Earth).
- [26] DLR. Collaborative processes and services for aeronautics and space - cooperants-projekt gestartet. [https://www.dlr.de/irs/desktopdefault.aspx/tabid-11893/20910\\_read-76625/admin-1/](https://www.dlr.de/irs/desktopdefault.aspx/tabid-11893/20910_read-76625/admin-1/).
- [27] LROC :: QuickMap. <https://quickmap.lroc.asu.edu>.
- [28] DIANA - Dedicated Infrastructure and Architecture for Near-Earth Astronautics. <https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/89732>.
- [29] N. Leach, A. Carlson, B. Khoshnevis, et al. Robotic Construction by Contour Crafting: The Case of Lunar Construction. <http://dx.doi.org/10.1260/1478-0771.10.3.423>, 10(3):423–438, 9 2012.

- [30] T. Maheswaran, J. Ganzmann, D. Acker, et.al. Logistical Infrastructure for an ISRU-based Sunshade Concept to Support Climate Action, 2023.
- [31] A Geologic Assessment of Potential Lunar Ores. <https://space.nss.org/settlement/nasa/spaceres/V-4.htm>. Accessed: 2023-08-28.
- [32] D. Acker, E. Gutierrez, A. Kugic, et al. An innovative and interdisciplinary approach to a self-sustainable lunar village. *Proceedings of the 73<sup>rd</sup> IAC*, 2022.
- [33] B. Thibodeau. A method for the extraction of alumina and silica from lunar regolith using hydrochloric acid. Master's thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University, 2022.
- [34] T. Becker, A. Lüking, T. Meinert, et.al. MoonFibre-Fibres from Lunar Regolith. 2019.
- [35] KA. Zacny, G. Mungas, C. Mungas, et.al. Pneumatic excavator and regolith transport system for lunar ISRU and construction. *Space 2008 Conference*, 2008.
- [36] RP. Mueller, JD. Smith, JM. Schuler, et.al. Design of an excavation robot: regolith advanced surface systems operations robot (rassor) 2.0. In *ASCE Earth & Space Conference*, number STI NO. 25616, 2016.
- [37] EW. Schaler, SA. Howe, A. Hsu, et.al. FLOAT-Flexible Levitation on a Track. 2022.
- [38] D. Acker, E. Gutierrez, JP. Calatayud, et al. An Analysis of the Requirements for a Sustainable Lunar Transportation System to Enable Initial DIANA Infrastructure. *Journal of Physics: Conference Series*, 2526(1):012115, 6 2023.
- [39] T. Maheswaran. Analyse der logistischen Konstruktionsaspekte eines Sonnenschildkonzeptes im Einflussbereich des Sonne Erde L1 Lagrange Punktes, 2017.
- [40] PM. Taylor, PI. Pappa, et.al. Vertical Solar Array Technology (VSAT), 10 kW in a Box. [https://isic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/846-SP%20Monthly%20Meeting%20-%202021%2005%20May\\_Presentation%20-%20Chuck%20Taylor.pdf](https://isic.jhuapl.edu/uploadedDocs/focus-files/846-SP%20Monthly%20Meeting%20-%202021%2005%20May_Presentation%20-%20Chuck%20Taylor.pdf).
- [41] A. Marcinkowski, L. Carrio, et. al. Lunar Surface Power Architecture Concepts | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10115621>.
- [42] S. Oleson, T. Packard, and et.al. A Deployable 40 kWe Lunar Fission Surface Power Concept - NASA Technical Reports Server (NTRS).
- [43] C. Mortan. Thin Film Perovskite Solar Cells: Fabrication via Spin Coating, Flash Evaporation and Chemical Vapor Deposition (CVD). 2020.
- [44] Technical Glass Products: Properties of Fused Quartz. <https://technicalglass.com/technical-properties/>.
- [45] Silicone rubber - Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Silicone\\_rubber](https://en.wikipedia.org/wiki/Silicone_rubber).
- [46] What is Density of Aluminum?, Definition, Properties, Uses. <https://www.toppr.com/guides/physics/fundamentals/what-is-density-of-aluminum/>.
- [47] Nickeloxid 99.99% trace metals basis | Sigma-Aldrich. <https://www.sigmaaldrich.com/DE/de/product/aldrich/203882>.
- [48] Halide lead perovskites for ionizing radiation detection - PMC. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6403296/>.
- [49] Tin(IV) oxide | SnO<sub>2</sub> | CID 29011 - PubChem. [https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Tin\\_IV\\_oxide](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Tin_IV_oxide).
- [50] K.S. de Boer. Bewegungen von Erde und Mond: Zeit, Mondphasen, Finsternisse.
- [51] EPKI. Perovskite-based photovoltaics: A unique chance for European PV-industry A White Paper from the European Perovskite Initiative. 2019.
- [52] Can Mirrors Boost Solar Panel Output? - Energy Theory. <https://energytheory.com/can-mirrors-boost-solar-panel-output/>.
- [53] Raising a PV system's yield by 20% with mirror reflectors – pv magazine International. <https://www.pv-magazine.com/2020/03/19/raising-a-pv-systems-yield-by-20-with-mirror-reflectors/>.
- [54] R. Chen, C. Zhou, LL. Cheng. Computer-vision-guided semi-autonomous concrete crack repair for infrastructure maintenance using a robotic arm. *AI in Civil Engineering*, 1(1):9, 2022.
- [55] AS. Howe, BH. Wilcox, H. Nayar, et.al. Maintenance-optimized modular robotic concepts for planetary surface isru excavators. In *2020 IEEE Aerospace Conference*, pages 1–15. IEEE, 2020.
- [56] A. Beyer, G. Grunwald, M. Heumos, et.al. Caesar: Space robotics technology for assembly, maintenance, and repair. In *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*, 2018.
- [57] SpaceX - Starship. <https://www.spacex.com/vehicles/starship/>.